

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) RU (11) **2 620 579** (13) C2ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(51) МПК

[H01F 7/02 \(2006.01\)](#)[G01R 33/38 \(2006.01\)](#)[H05H 1/16 \(2006.01\)](#)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

Статус: действует (последнее изменение статуса: 19.06.2017)
Пошлина: учтена за 3 год с 13.10.2017 по 12.10.2018(21)(22) Заявка: [2015143578](#), 12.10.2015(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
12.10.2015

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 12.10.2015

(43) Дата публикации заявки: 17.04.2017 Бюл. №
[11](#)(45) Опубликовано: [29.05.2017](#) Бюл. № [16](#)(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: RU 2138871 C1, 27.09.1999. RU
2284599 C1, 27.09.2006. SU 1741183 A1,
15.06.1992. EP 0623939 A1, 09.11.1994. US
4580129 A, 01.04.1986.

Адрес для переписки:

620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19,
Уральский федеральный университет,
Центр интеллектуальной собственности,
Невраевой Н.П.

(72) Автор(ы):

Кудреватых Николай Владимирович (RU),
Маслов Анатолий Николаевич (RU),
Волегов Алексей Сергеевич (RU),
Козлов Алексей Иванович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

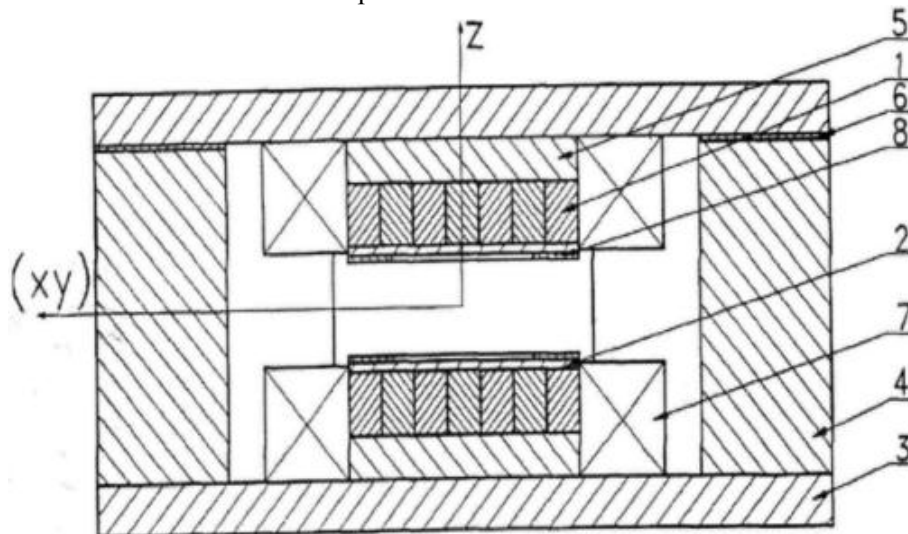
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования "Уральский федеральный
университет имени первого Президента
России Б.Н. Ельцина" (RU),
Акционерное общество "Научно-
производственное объединение
автоматики имени академика Н.А.
Семихатова" (RU)

(54) МАГНИТНАЯ СИСТЕМА

(57) Реферат:

Изобретение относится к электротехнике и может быть использовано в малогабаритных приборах ЯМР- и ЭПР-спектроскопии высокого спектрального разрешения. Технический результат состоит в повышении степени однородности магнитного поля в рабочей области системы и увеличении его напряженности. Магнитная система содержит заключенные в замкнутый магнитопровод две установленные параллельно друг другу с образованием воздушного зазора остаточного намагниченности пластины, выполненные наборными из жестко соединенных между собой постоянных магнитов. Каждый из них имеет фиксированное соответствующее расчетному значению модуля вектора магнитного момента и его пространственную ориентацию в теле магнита согласно местоположению в пластине. С одной стороны магнитные пластины жестко соединены с магнитопроводом. Пластина по размещению магнитов делится на три концентрические зоны: центральную, составляющую по площади ($S_{\text{ц}}$) величину 10-15% от всей площади полюса (S), периферийную, имеющую площадь ($S_{\text{п}}$), равную 54-60% от величины S , и

промежуточную, равную по площади $S_{пр}$ разности $S_{пр}=S-(S_{ц}+S_{п})$. В центральной зоне установлены идентичные по величине магнитного момента магниты с ориентацией вектора остаточной намагниченности перпендикулярно плоскости пластины. Модуль их вектора составляет величину 0,6 по отношению к таковому у периферийных магнитов с аналогичной ориентацией вектора остаточной намагниченности. В промежуточной зоне установлены магниты с величиной модуля вектора остаточной намагниченности, равной таковой у периферийных, но с его ориентацией в теле магнита в направлении к центру пластины под углом в диапазоне $50\div 60^\circ$ относительно нормали к плоскости пластины. 2 з.п. ф-лы, 14 ил.



Фиг.1

Изобретение относится к магнитным системам для получения однородного постоянного магнитного поля, в частности малогабаритным магнитным системам, используемым в устройствах и приборах ЯМР- и ЭПР-спектроскопии.

Магнитная система является основной частью ЯМР- и ЭПР-спектрометров, определяющих их габариты и массу. Для создания малогабаритных спектрометров необходимы магнитные системы малого размера с достаточно высокими величинами напряженности и однородности магнитного поля в «рабочей» области пространства (в области размещения исследуемого объекта).

Известны магнитные системы для использования в ЯМР-аналитических приборах. В частности, в работе «Компактный постоянный магнит» (Васильев П.А., Водянов Н.Г., Приборы и техника эксперимента, 1992 г., №1, с. 165-166) для создания постоянного магнитного поля использованы постоянные магниты из магнитотвердого сплава ЮНДК, имеющего относительно низкую магнитную энергоемкость. Это обстоятельство обусловило ее довольно высокие габариты - $240\times 240\times 140$ мм. Кроме того, такая система имела довольно сложную конструкцию с наличием подмагничивающих катушек, что не обеспечивало ее полную энергонезависимость.

Известна магнитная система, в которой снижение ее габаритов достигнуто благодаря использованию постоянных магнитов из более энергоемкого магнитотвердого материала на основе интерметаллида SmCo_5 (Кернасук И.С. и др. «Радиоспектроскопия», Материалы IX Всесоюзной школы по магнитному резонансу» Пермь, 1987 г. с. 309-313). Магнитная система состоит из корпуса, представляющего собой замкнутый магнитопровод бронированного типа из магнитомягкого материала, магнитных пластин (постоянных магнитов) из SmCo_5 полюсных наконечников, приспособления для юстировки, подмагничивающих катушек. В системе используются комбинированные профили полюсов, состоящие одновременно из «усиливающего» и «проводящего» наконечников. На лицевой стороне наконечников нанесены магнитные шиммы для дополнительного увеличения однородности поля.

Недостатком системы является сложность конструкции, довольно большая масса (14 кг), неудобства в работе, связанные с трудностью доступа к рабочему полю, малая область высокой однородности.

Близкой по достигаемому результату является малогабаритная магнитная система для спектрометра ЯМР на основе магнитов из сплава Nd-Fe-B (Васильев П.А., Сайкин К.С. Приборы и техника эксперимента, 1993 г., №3, с. 211-214). Основными элементами конструкции системы являются ярмо и вкладыши из магнитомягкой стали, образующие замкнутый магнитопровод и расположенные параллельно друг другу с образованием воздушного зазора, магнитные пластины (постоянные магниты)

из сплава Nd-Fe-B с полюсными наконечниками. На наружной части магнитопровода расположены катушки сдвига поля, а внутри системы - корректирующие катушки. Требуемая однородность поля достигается пропусканием тока через них и с помощью кольцевых шиммов.

Недостатком данной системы является относительно малая область однородности поля и необходимость ее поддержания с помощью пропускания стабильного по величине тока через корректирующие катушки, что делает ее энергозависимой, и технологические сложности изготовления, связанные прежде всего с трудностью отбора пары идентичных магнитных пластин по величине остаточной индукции и характеру распределения остаточной намагниченности в теле пластины.

Наиболее близкой по достигаемому результату, направленному на дальнейшее снижение габаритов и массы магнитной системы и повышению степени однородности магнитного поля в рабочем зазоре межполюсного пространства и ее энергонезависимости, является магнитная система, заявленная в патенте РФ №2138871 (МПК 6 H01F 7/02, H01J 23/087, опубликован 27.09.1999). Магнитная система содержит заключенные в замкнутый магнитопровод из магнитомягкого материала две установленные параллельно друг другу с образованием воздушного зазора магнитные пластины, собранные из жестко соединенных между собой элементов - постоянных магнитов в форме параллелепипеда. Каждый из них намагничивается независимо и его остаточная намагниченность доводится до требуемого согласно расположению в пластине уровня остаточной намагниченности с погрешностью не хуже $\pm 0,2\%$. Такой подход обеспечивает максимальную идентичность пластин, что позволяет добиваться высокой однородности магнитного поля (на уровне 10^{-4}), не прибегая к использованию корректирующих катушек.

Недостатком такой магнитной системы является не 100% использование потенциала магнитотвердого материала центральных элементов пластины (их намагниченность составляет величину 0,65 от таковой для периферийных элементов), что не позволяет достигнуть максимально возможной при используемом количестве элементов в пластине напряженности магнитного поля и более высокой, чем 10^{-4} , однородности поля в рабочей области межполюсного пространства.

Задачей изобретения является повышение эффективности использования магнитного потенциала элементов пластины и повышение однородности магнитного поля в рабочем пространстве до уровня 10^{-5} без изменения габаритов и массы самой магнитной системы с сохранением ее энергонезависимости.

Это достигается за счет того, что в магнитной системе, содержащей заключенные в замкнутый магнитопровод из магнитомягкого материала две установленные параллельно друг другу магнитные пластины, выполненные наборными из жестко соединенных между собой отдельных магнитов, одни стороны которых снабжены полюсными наконечниками из магнитомягкого материала и обращены друг к другу с образованием воздушного зазора, а противоположные стороны пластин соединены с магнитопроводом, наборные отдельные магниты пластин разделены на три концентрические зоны: центральную, площадь которой составляет 10-20% от всей площади пластины, периферийную площадью 50-60% от всей площади пластины и промежуточную, равную по площади разности между полной площадью пластины и площадями центральной и периферийной зон, в центральной зоне установлены идентичные по величине магнитного момента магниты с ориентацией вектора остаточной намагниченности магнитов перпендикулярно плоскости пластины, а модуль их вектора остаточной намагниченности составляет величину 0,6 по отношению к величине модуля вектора остаточной намагниченности у периферийных магнитов с аналогичной ориентацией вектора остаточной намагниченности, в промежуточной зоне установлены магниты с величиной модуля вектора остаточной намагниченности магнитов, равной величине модуля вектора остаточной намагниченности у периферийных магнитов, с его ориентацией в направлении к центру пластины под углом в диапазоне $50\div 60^\circ$ относительно нормали к плоскости пластины.

Для компактности конструкции магнитопровод выполнен в виде двух жестко соединенных четырьмя стойками несущих квадратных пластин из магнитомягкого материала, образующих жесткий каркас, причем несущие квадратные пластины расположены параллельно магнитным пластинам, выполненным также в форме квадрата, развернуты по отношению к ним на угол 45° и жестко соединены с ними.

Для коррекции величины и степени однородности магнитного поля между стойками и одной из несущих пластин размещены котирующие прокладки из магнитомягкого материала.

Сущность изобретения поясняется графическими материалами, где представлены на

- фиг. 1 - симметричный диагональный разрез магнитной системы,
- фиг. 2 - симметричный разрез магнитной системы плоскостью, параллельной несущей пластине,
- фиг. 3 - схема ориентации векторов остаточной намагниченности в «нижней» пластине согласно заявляемому изобретению в центральной, периферийной и промежуточной зонах со стороны воздушного зазора,
- фиг. 4 - схема ориентации векторов остаточной намагниченности в «нижней» пластине согласно заявляемому изобретению в центральной, периферийной и промежуточной зонах в центральном сечении,
- фиг. 5 - схема ориентации векторов остаточной намагниченности в «верхней» пластине согласно заявляемому изобретению в центральной, периферийной и промежуточной зонах со стороны воздушного зазора,
- фиг. 6 - схема ориентации векторов остаточной намагниченности в «верхней» пластине согласно заявляемому изобретению в центральной, периферийной и промежуточной зонах в центральном сечении,
- фиг. 7 - схема ориентации векторов остаточной намагниченности в «нижней» пластине согласно прототипу со стороны воздушного зазора,
- фиг. 8 - схема ориентации векторов остаточной намагниченности в «нижней» пластине согласно прототипу в центральном поперечном сечении,
- фиг. 9 - схема ориентации векторов остаточной намагниченности в «верхней» пластине согласно прототипу со стороны воздушного зазора,
- фиг. 10 - схема ориентации векторов остаточной намагниченности в «верхней» пластине согласно прототипу в центральном поперечном сечении,
- фиг. 11 - распределение Z-компоненты магнитного поля (H_z) вдоль всех трех координатных осей, имеющих начало в геометрическом центре воздушного зазора, в прототипе (без полюсного наконечника),
- фиг. 12 - распределение H_z вдоль всех трех осей в прототипе с полюсным наконечником.
- фиг. 13 - распределение H_z вдоль всех трех осей магнитной системы без полюсных наконечников, созданной согласно заявляемому изобретению.
- фиг. 14 - распределение H_z вдоль всех трех осей в магнитной системе с полюсным наконечником, созданной согласно заявляемому изобретению.

Позиции на чертежах обозначают: 1 - магнитные пластины, набранные из отдельных элементов - постоянных магнитов, 2 - полюсные наконечники, 3 - несущие пластины, 4 - стойки, 5 - крепежные пластины, 6 - прокладки, 7 - катушки сдвига магнитного поля для обеспечения развертки по величине поля, 8 - рамочные шиммы.

Магнитные пластины 1 представляют собой набор намагниченных до расчетных и строго контролируемых значений магнитного момента (модуля и ориентации вектора остаточной намагниченности) постоянных магнитов из высококоэрцитивного сплава (например, Nd-Fe-B), в частности, в форме параллелепипедов с квадратным основанием, жестко соединенных (склеенных) боковыми гранями друг с другом так, что торцевые грани образуют параллельные друг другу полюсные поверхности (стороны магнитных пластин). К магнитным пластинам 1 со стороны воздушного зазора приклеены полюсные наконечники 2, а к противоположным сторонам - крепежные пластины 5 из магнитомягкого материала, которые, в свою очередь, жестко прикреплены к несущим пластинам 3 с помощью винтов. Несущие пластины 3 и соединяющие их стойки 4 выполнены из магнитомягкого материала и образуют замкнутый магнитопровод, являющийся одновременно каркасом системы. Между одной из несущих пластин 3 и стойками 4 размещены котировочные прокладки 6 из тонколистового магнитомягкого материала. В случае необходимости (использование системы в ЭПР-спектрометре) в систему могут быть введены катушки 7 сдвига величины магнитного поля - полевой развертки в требуемом диапазоне.

Дополнительная возможность повышения однородности магнитного поля достигается путем установки на полюсных наконечниках 2 рамочных шиммов 8. Стойки 4 могут быть выполнены в виде трехгранных призм с затупленными острыми углами, торцы которых имеют размеры и профиль, обеспечивающие их совмещение с угловыми частями соответствующих сторон несущих пластин 3. Для достижения максимальной компактности, несущие пластины 3, также как магнитные 1 и крепежные 5, выполняются квадратными. Полюсные наконечники 2 имеют также форму квадратной пластины, при этом длины сторон магнитной 1, крепежной 5 пластин и полюсного наконечника 2 равны. Стойки 4 размещены в углах несущих пластин 3 с совмещением их торцов с угловыми частями этих пластин и закреплены с помощью винтов.

Образовавшиеся четыре окна обеспечивают доступ в рабочий зазор системы для размещения радиотехнических узлов и исследуемых объектов.

Было изготовлено несколько экспериментальных магнитных систем с габаритными размерами $140 \times 140 \times 65$ мм, массой 9 кг, величиной воздушного зазора 17 мм и использованием спеченных порошковых магнитов из сплава Nd-Fe-B в форме кубика $10 \times 10 \times 10$ мм.

Магнитные пластины в первой магнитной системе изготавливались в соответствии с формулой изобретения прототипа, а именно: периферийные магниты имели в свободном состоянии индукцию 0,65 Тл, а центральные - 65% от этой величины (0,42 Тл). Ориентации векторов остаточной намагниченности всех магнитов были параллельны друг другу и перпендикулярны поверхности магнитной пластины (фиг. 7, 8, 9, 10). Созданное в такой магнитной системе распределение Z-компоненты магнитного поля (H_Z) вдоль всех трех координатных осей, имеющих начало в геометрическом центре воздушного зазора (без полюсного наконечника), показано на фиг. 11. Величина магнитного поля в центре системы составила 1625 мТл. Как видно, область однородности магнитного поля в такой системе невелика (в особенности вдоль оси Z) и может быть улучшена до 10^{-4} вдоль этой оси на отрезке 10 мм введением полюсных наконечников толщиной 2 мм (фиг. 12).

Вторая магнитная система была изготовлена согласно формуле настоящего изобретения, а именно: магниты периферийной зоны, как и в прототипе, имели в свободном состоянии индукцию $B_d = 0,65$ Тл, четыре магнита центральной зоны - индукцию на 40% ниже магнитов периферийной зоны, а в промежуточной зоне восемь магнитов имели B_d такую же, что и магниты в периферийной зоне, но вектор остаточной намагниченности в них был отклонен от нормали к торцу каждого магнита на угол 53° («косые» магниты). При установке этих магнитов в магнитную пластину 1 их векторы остаточной намагниченности «смотрели» всегда на центр магнитной пластины 1. Созданное в такой системе распределение H_Z также вдоль всех трех осей, как без наконечника, так и с полюсным наконечником, представлено соответственно на фиг. 13 и фиг. 14.

Как видно, такая конфигурация обеспечивает как большую величину напряженности магнитного поля в центре межполюсного пространства (2120 мТл вместо 1625 мТл у прототипа), так и более высокую его однородность вдоль Z-оси (на отрезке 10 мм - 3×10^{-5}).

Следует отметить, что намагничивание магнитов «под углом» к его боковым граням было возможным благодаря использованию «кубиков» из спеченного порошка сплава Nd-Fe-B, полученных без операции текстурования (изотропные магниты). Именно поэтому их величина остаточной индукции была на уровне 0,65 Тл, а не 1,3-1,4 Тл, как у лучших анизотропных магнитов из такого материала.

Не составляет большого труда изготовление такой пластины и из анизотропных магнитов. В этом случае потребуется лишь специальная оснастка для вырезки «косых» магнитов из спеченной заготовки. Представляется, что в этом случае напряженность магнитного поля будет увеличена в 1,5-2 раза, а степень его однородности останется на прежнем уровне.

Таким образом, заявляемое изобретение позволяет как увеличить напряженность магнитного поля в магнитной системе, используя одинаковое количество магнитов в пластине и тем самым, если потребуется, такое же значение напряженности поля, как у прототипа, то есть сэкономить на магнитотвердом материале (брать более короткие магниты), так и, что весьма существенно, повысить почти на порядок степень его однородности вдоль Z-оси. Последнее весьма важно при использовании магнитной системы в портативных ЭПР-спектрометрах повышенного разрешения.

Формула изобретения

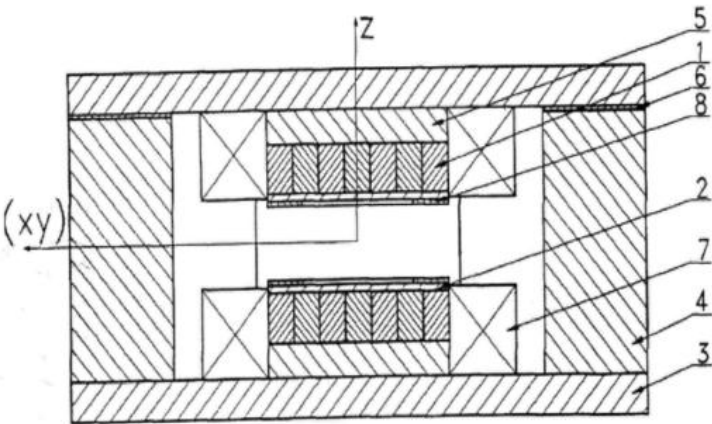
1. Магнитная система, содержащая заключенные в замкнутый магнитопровод из магнитомягкого материала две установленные параллельно друг другу магнитные пластины, выполненные наборными из жестко соединенных между собой отдельных магнитов, одни стороны которых снабжены полюсными наконечниками из магнитомягкого материала и обращены друг к другу с образованием воздушного зазора, а противоположные стороны пластин соединены с магнитопроводом, отличающаяся тем, что наборные отдельные магниты пластин разделены на три концентрические зоны: центральную, площадь которой составляет 10-20% от всей площади пластины, периферийную площадью 50-60% от всей площади пластины и промежуточную, равную по площади разности между полной площадью пластины и

площадями центральной и периферийной зон, в центральной зоне установлены идентичные по величине магнитного момента магниты с ориентацией вектора остаточной намагниченности магнитов перпендикулярно плоскости пластины, а модуль их вектора остаточной намагниченности составляет величину 0,6 по отношению к величине модуля вектора остаточной намагниченности у периферийных магнитов с аналогичной ориентацией вектора остаточной намагниченности, в промежуточной зоне установлены магниты с величиной модуля вектора остаточной намагниченности магнитов, равной величине модуля вектора остаточной намагниченности у периферийных магнитов, с его ориентацией в направлении к центру пластины под углом в диапазоне $50\div 60^\circ$ относительно нормали к плоскости пластины.

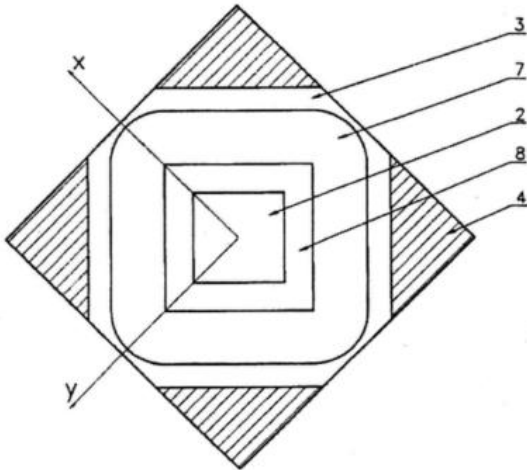
2. Магнитная система по п. 1, отличающаяся тем, что магнитопровод выполнен в виде двух жестко соединенных четырьмя стойками несущих квадратных пластин из магнитомягкого материала, образующих жесткий каркас, причем несущие квадратные пластины расположены параллельно магнитным пластинам, выполненным также в форме квадрата, развернуты по отношению к ним на угол 45° и жестко соединены с ними.

3. Магнитная система по п. 1, отличающаяся тем, что между стойками и одной из несущих пластин установлены юстировочные прокладки из магнитомягкого материала.

Магнитная система



Фиг.1

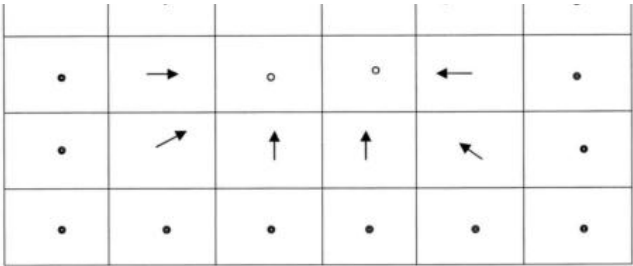


Фиг.2

1

Магнитная система

•	•	•	•	•	•
•	↘	↓	↓	↙	•
•	→	○	○	←	•

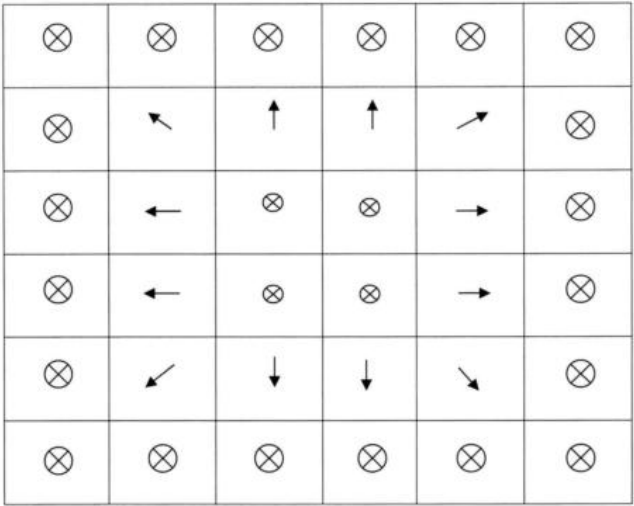


Фиг.3



Фиг.4

Магнитная система

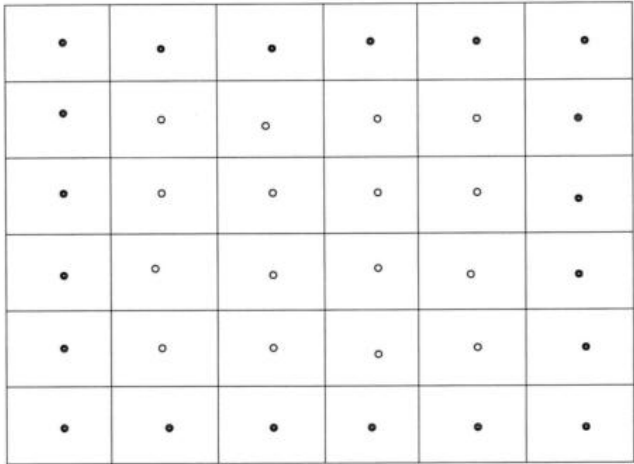


Фиг.5



Фиг.6

Магнитная система

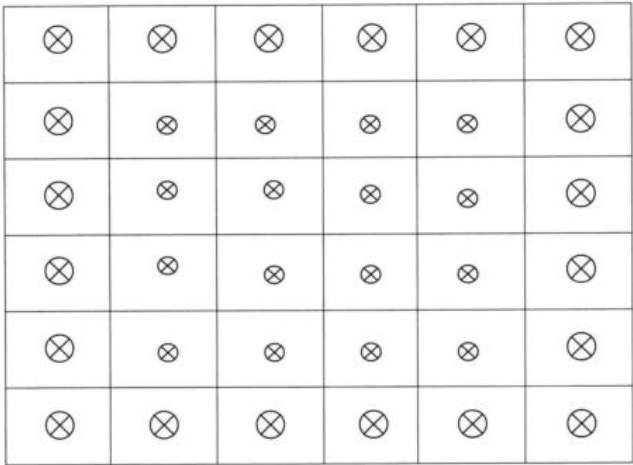


Фиг.7



Фиг.8

Магнитная система

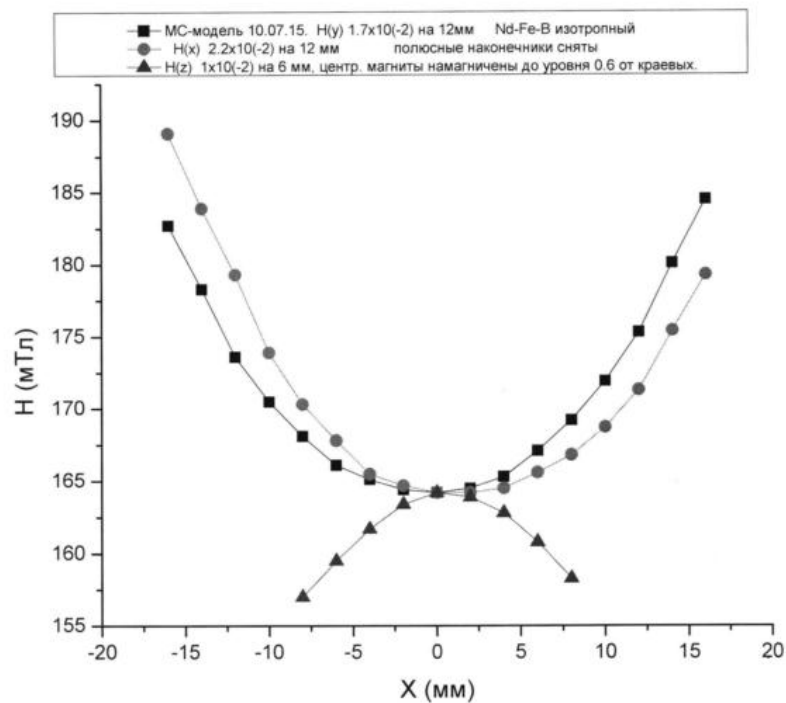


Фиг.9



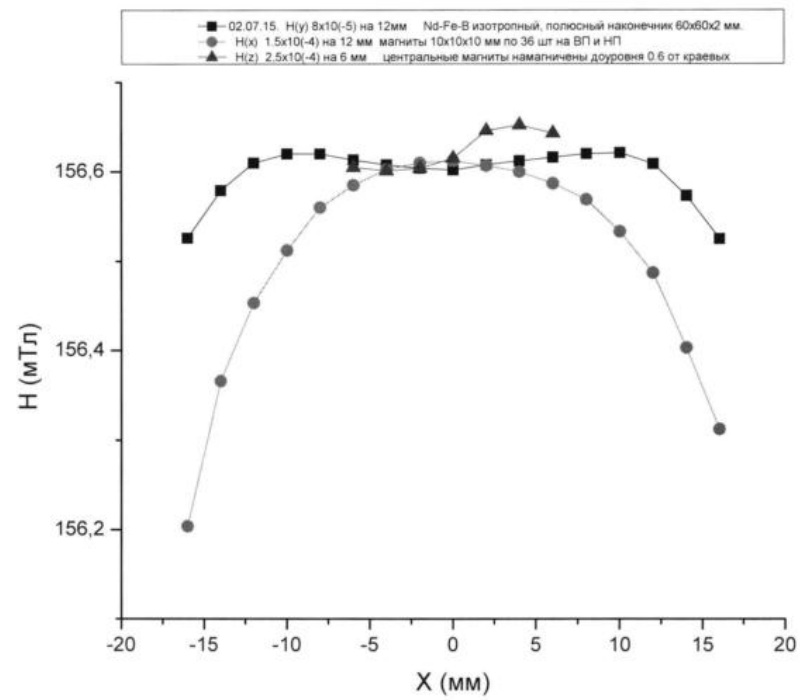
Фиг.10

Магнитная система



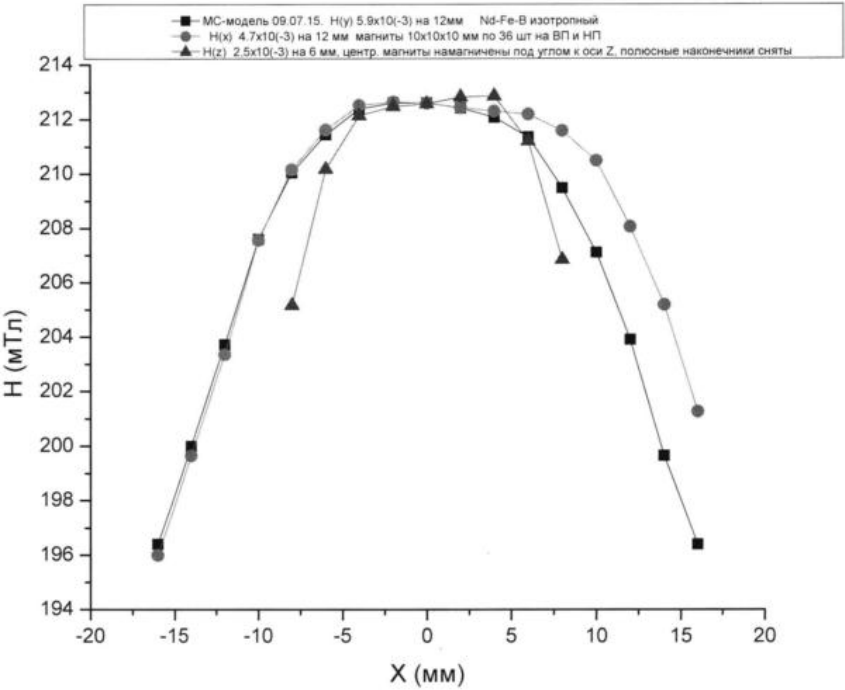
Фиг.11

Магнитная система



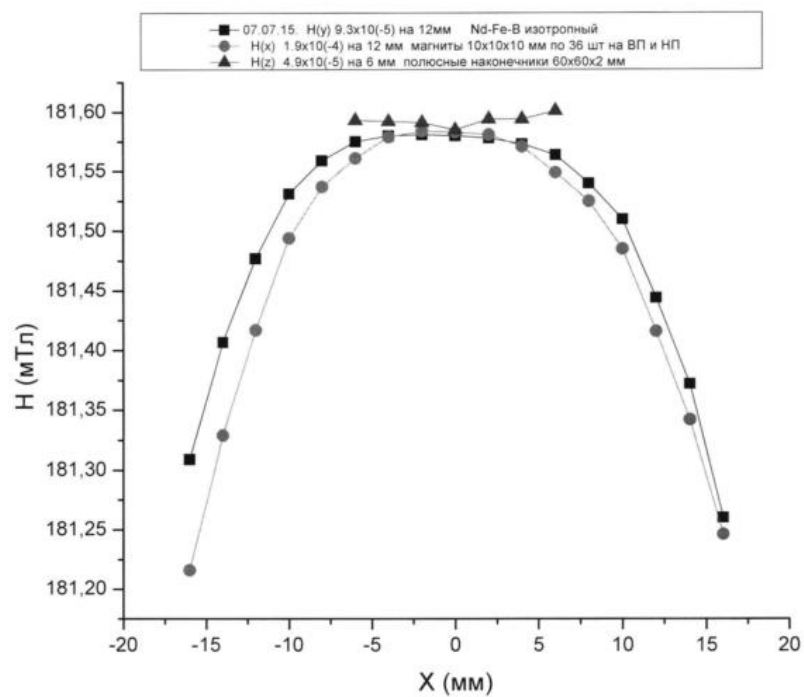
Фиг.12

Магнитная система



Фиг.13

Магнитная система



Фиг.14